

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

Studium problematiky odlévání kovů do geopolymerních materiálů

Study the issue of casting metals to geopolymer materials

KMT – B – 205

Kryštof Luňák

Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant: Ing. Trinh Thi Linh

Počet stran: 57

Počet tabulek: 1

Počet obrázků: 92

Počet příloh: 0

Datum 22. 5.2013

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 22. května 2013

Podpis:

Kryštof Luňák

Poděkování

Mé poděkování patří všem, kteří mně během mého studia stále podporovali, a to zejména mé přítelkyni, rodině a přátelům. Dále musím moc poděkovat doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D za trpělivé a svědomité vedení mé bakalářské práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Trinh Thi Linh za pomoc při přípravě geopolymerů. Poté nesmím zapomenout na pana Ing. Davida Pospíšila a pana Ing. Mateusze Fijalkowského, Ph.D., kteří mi pomáhali s výrobou vložek a při odlévání kovu do vzorků.

Anotace

Cílem mé bakalářské práce je seznámení se s problematikou odlévání kovu do geopolymerních materiálů. Jako geopolymerní materiál byla vybrána směs Baucisu L160 s aktivátorem L160 a jako plnivo do této směsi byl vybrán lupek A111 o různém zastoupení ve směsi. Jako medium pro odlévání byla vybrána slitina cínu a olova při 40% zastoupení cínu a 60% zastoupení olova. Po odlití a vyjmutí ztuhlé stitiny ze vzorků byly vzorky podrobeny vizuální analýze a hodnocení.

Klíčová slova

Geopolymer, aluminosilikát, cement, alkalicky aktivovaný materiál, geopolymrace.

Annotation

My aim in the Bachelor thesis is familiar with the issue of casting metals to geopolymer materials. As a geopolymer material was selected blend of Baucis L160 with Activator L160 and as a filler in the mixture was selected shale A111 at various concentrations in the mixture. As a medium for casting was selected alloy of tin and lead at 40% of tin and 60% of lead. After casting and removing the solidified samples of alloy, the samples were subjected to visual analysis and evaluation.

Keywords

Geopolymer, aluminosilicate, cement, alkali-activated material, geopolymization.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Teoretická část.....	10
2.1 Co je to geopolymery.....	10
2.2 Geopolymer v starověku	10
2.3 Novodobá historie a výzkum geopolymery.....	11
2.4 Struktura geopolymery.....	12
2.5 Vlastnosti geopolymery.....	13
2.6 Mechanismus geopolymery.....	14
2.6 Suroviny pro přípravu geopolymery.....	15
2.6.1 Metakaolin.....	16
2.6.2 Struska.....	16
2.6.3 Popílek.....	16
2.7 Alkalické aktivátory	17
2.7.1 Hydroxidy.....	17
2.7.2 Vodní sklo	17
2.7.3 Alkalické soli – uhličitany alkalických kovů	17
3. Experimentální část	18
3.1 Forma	18
3.2 Příprava vložek.....	18
3.2.1 Vložky „A“ pro experiment I. a II.....	19
3.2.2 Vložky „B“ pro experiment III., IV. a V.....	20
3.3 Zkušební vzorky.....	21
3.3.1 Příprava vzorků pro experiment I.....	23
3.3.2 Příprava vzorků pro experiment II.	23

3.3.3 Příprava vzorků pro experiment III.	24
3.3.4 Příprava vzorků pro experiment IV.	25
3.3.5 Příprava vzorků pro experiment V.	26
3.3.6 Příprava vzorků pro experiment III. A	26
3.4 Testy s litím roztavené taveniny do vzorků.....	27
3.4.1 Průběh zkoušek	27
3.4.1.1 Test lití taveniny 1	28
3.4.1.2 Test lití taveniny 2	32
3.4.1.3 Test lití taveniny 3	38
3.4.1.4 Test lití taveniny 4	45
4. Diskuse výsledků.....	53
5. Závěr.....	55
6. Literatura a použité zdroje.....	56

1. Úvod

Geopolymerní materiály se v posledních desetiletích dostaly do popředí zájmu nejen z hlediska výzkumných aktivit, ale také z hlediska jejich praktického využití. Geopolymery jsou zajímavé svojí přijatelnou cenou, vhodnými mechanickými vlastnostmi, výhodnými technologickými vlastnostmi, odolností vůči řadě chemických prostředí, způsobem zpracování a také vysokou tepelnou odolností. Geopolymerní materiály by ve vybraných případech mohly nahradit klasické stavební materiály, jakými jsou v současné době například široce používané cementy.

Standardní portlandský cement odolává pevnosti v tlaku cca 30 MPa po 28 dnech, geopolymerní materiály vykazují hodnoty pevnosti v tlaku vyšší cca 50-60 MPa. Tepelná odolnost standardního cementu je cca 600°C, zatímco v případě geopolymerních materiálů lze dosáhnout tepelné odolnosti 900° až 1000°C.

Cílem bakalářské práce bylo posoudit chování navrženého geopolymerního systému v případě jeho přímého kontaktu s roztaveným kovem nebo roztavenou slitinou. Téma této práce bylo navrženo v souladu se společnými výzkumnými aktivitami Technické univerzity v Liberci a Ústavem jaderného výzkumu v Řeži, a.s.

Práce je zaměřena na návrh způsobu hodnocení tepelného namáhání geopolymerního materiálu, návrh vhodného materiálového složení geopolymerního systému, který vydrží skokovou teplotní zátěž vyšší než 600°C a hodnocení změn geopolymerního materiálu vystaveného těmto teplotám v případě jednonásobného a vícenásobného tepelného namáhání.

2. Teoretická část

2.1 Co je to geopolymer

Názvem geopolymer je označován anorganický synteticky vyrobený polymerní materiál, připravovaný reakcí základních alumino-silikátových minerálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce je dnes označována jako geopolymerace. Geopolymery jsou na první pohled často nerozeznatelné od kamene a svými vlastnostmi je mohou i převyšovat. Patří k nim především odolnost vůči kyselým dešťům, vysokým teplotám, bakteriím a také vysoké mechanické vlastnosti. Díky těmto vlastnostem se mohou využít zejména jako izolační a stavební materiály. [1]

2.2 Geopolymer v starověku

Pojem geopolymer poprvé vyslovil francouzský profesor a chemik Dr. Joseph Davidovits. Bylo to na egyptologickém kongresu v Lyonu v roce 1974, kde světu představil svou novou hypotézu o způsobu stavby pyramid s použitím umělého kamene. Podle Davidovitsovy teorie lidstvo, na různé úrovni pracuje s geopolymery téměř 5000 let. Problematické rozlišení geopolymeru od přírodního kamene, a také skutečnost, že staří Egypťané neměli k dispozici takové stavební dovednosti či vynález kola, vedly profesora Davidovitse k přesvědčení, že se jednotlivé kvádry těchto monumentálních staveb odlévaly do forem přímo na místě. Jeho hypotéza není dodnes oficiálně prokázána, přestože jí nasvědčuje hned několik faktů. V jeho prospěch hovoří analýza vnitřku kvádrů, při níž byly zjištěny vzduchové bubliny a voda, s kterými se nemůžeme u přírodního kamene setkat. Při studiu Cheopsovy pyramidy v Gíze údajně objevil v kvádru lidské vlasy a také rozdílnou hustotu kvádrů v jeho vrchní a spodní částí, kde hustota směrem vzhůru klesá. Zda jsou jeho hypotézy pravdivé, prověří další bádání. [2, 3]

Mezi další příklady použití geopolymerů u starých civilizací lze uvést cihly na stavbu zikkuratů ve starověké Mezopotámii. Zikkuraty jsou stupňovité věže pnoucí se do výše několika desítek metrů, mají několik teras nad sebou a na vrcholu schodiště vedoucí k svatyni, kam měl sestupovat bůh. Nejznámějším zikkuratem byl Mardukův zikkurat v Babylónu, známý pod názvem Babylonská věž. Na stavbu zikkuratů byly použity cihly, které mají výbornou trvanlivost, a při jejich zkoumání byla zjištěna velké podobnost se střepem pálených

cihel. Teorie pálení je však zpochybňována a nabízí se použití geopolymerního materiálu. Pro jeho tvorbu bylo v této oblasti dostatek potřebných surovin na rozdíl od paliva, kterého bylo pro výpal tak ohromného počtu cihel nedostatek. Tuto teorii o použití geopolymerních materiálů podporuje také nález zuhelnatělých organických vláken při analýze cihel. [4, 5]

2.3 Novodobá historie a výzkum geopolymérů

Ke znovuobjevení alkalicky aktivovaných materiálů došlo až v 30. letech 20. století s rozvojem výroby alkalicky aktivovaných cementů. Alkalická aktivace se původně používala pro vylepšení mechanických vlastností betonu. Do cementu se přidávaly příměsi s latentními hydraulickými vlastnostmi, jako jsou např. vysokopecní struska a popílky. Výroba těchto pojiv má dlouhou historii v zemích bývalého Sovětského svazu a Skandinávských zemích. Později se kromě výše uvedených odpadních materiálů začaly jako alkalicky aktivované materiály používat i přírodní hlinitokřemičitany a to převážně jílové materiály. V roce 1979 si již výše zmíněný profesor Joseph Davidovits nechal patentovat alkalické cementy pod jménem geopolymery. V těchto alkalických cementech byl jako hlinitokřemičitá složka použit metakaolin, který se připravil kalcinací s vápencem nebo dolomitem. Materiály na podobné bázi byly nezávisle na Davidovitsovi připraveny také ve Finsku pod názvem F-cement a Ukrajině jako Geocements. [5, 6]

Výzkum alkalicky aktivovaných materiálů pokračuje i nadále a zaměřuje se především na studium využití geopolymérů v různých odvětvích průmyslu. Pro svou výrobnou odolnost mohou sloužit především jako izolace a stavební materiál. Geopolymerní cement Parament byl například použit pro opravu letištní plochy v Los Angeles. Lze očekávat také využití geopolymérů při výstavbě silnic, protihlukových stěn, budov, mostů a jiných původně betonových staveb.[7]

Výsledky různých výzkumů zaměřených na geopolymery jsou pravidelně prezentovány na odborných konferencích. V posledních desítkách let například tyto: Alkaline Cements and Concrete v Kyjevě roku 1994, Alkali Activated Materials – Research, Production and Utilization v Praze roku 2007 a také Geopolymere pořádaný ve Francii v letech 1989, 1998 a 2005. [5]

2.4 Struktura geopolymu

Pro chemické označení geopolymu byl navržen profesorem Davidovitem název polysialáty, kde sialát označuje zkratku pro oxid hlinitokřemičitanu. Sialáty se skládají z tetraedrů SiO_4 a AlO_4 se střídavě spojenými atomy kyslíku, dohromady tvoří tzv. síť. Síť musí obsahovat ionty s kladnými náboji, jako jsou Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+ , aby vyrovnávaly náboj iontů hliníku Al^{3+} v tetraedrické koordinaci. [8]

Jejich empirický vzorec:



Kde „z“ je počet tetraedrických jednotek, „M“ je jednomocný kation draslíku, sodíku nebo vápníku a „n“ znamená stupeň polymerace. [9]

Geopolymer může mít jednu ze tří základních forem dle vazby křemíku k hliníku.

I. Polysialát:

$\text{Si}/\text{Al}=1$

$-\text{Si}-\text{OAl}-\text{O}-$

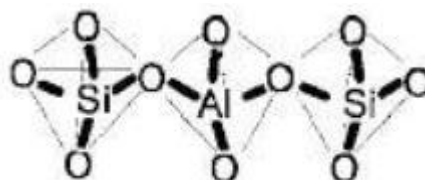


Obr. 1: Polysialát.

II. Polysiloxo-sialát:

$\text{Si}/\text{Al}=2$

$-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$

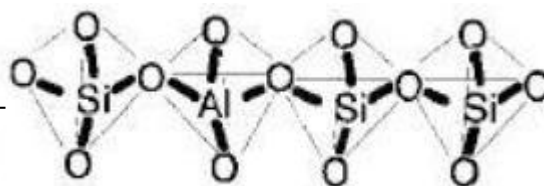


Obr. 2: Polysiloxo-sialát.

III. Polydisiloxo-sialát:

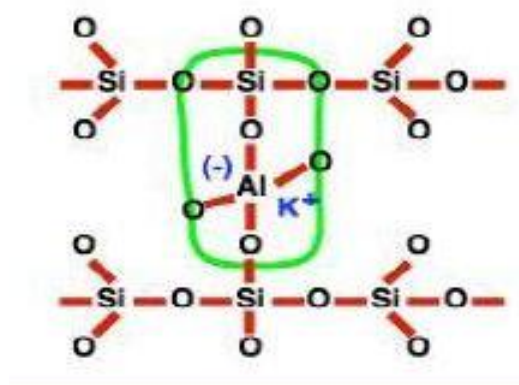
$\text{Si}/\text{Al}=3$

$-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$



Obr. 3: Polydisiloxo-sialát.

Polysialáty jsou řetězcovými polymery, ve kterých jsou atomy Al^{3+} a Si^{4+} v tetraedrickém uspořádání s atomy kyslíku. Jejich struktura se mění z čistě amorfní do částečně krystalické. Mohou také vytvářet vazby mezi polymerním řetězcem. Zesíťování může proběhnout tehdy, když je poměr atomů křemíků a hliníku v síti geopolymeru větší než dva. [9, 10]



Obr. 4: Zesíťovaný řetězec geopolymeru.

2.5 Vlastnosti geopolymerů

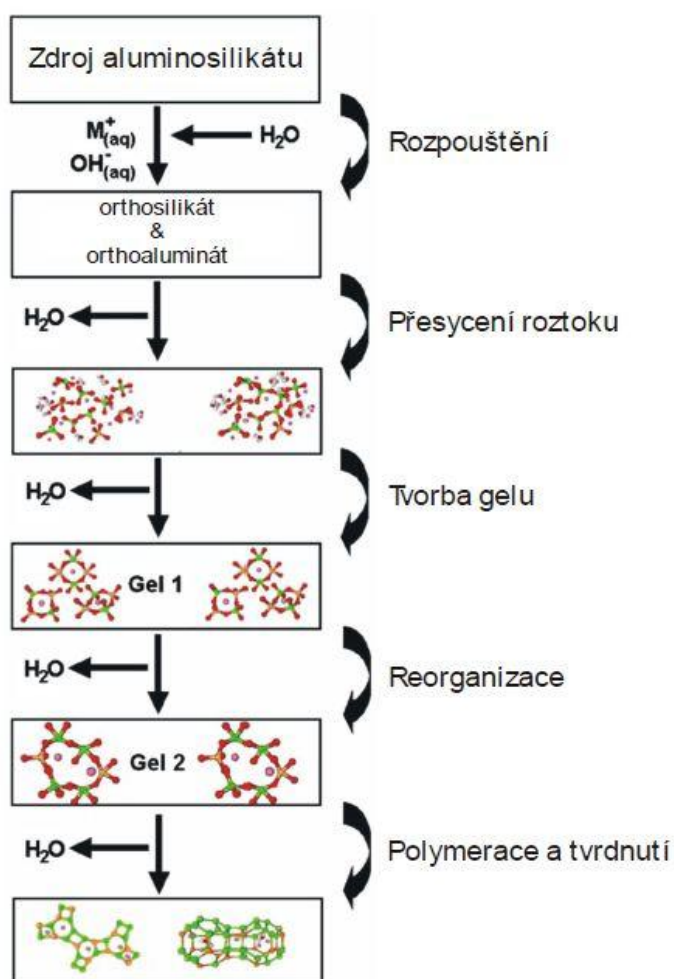
Geopolymery mají amorfní strukturu, která za vyšších teplot přechází na strukturu mikrokrytalickou. Mezi jejich základní vlastnosti patří nehořlavost, nerozpustnost ve vodě, mají dobrou odolnost proti vlivu zředěných kyselin a zásad, výborně odolávají teplotám až do 900 °C. Je do nich možno přidat řadu dalších materiálů i odpadních, které geopolymer uzavře do své polymerní sítě. Geopolymerní pasty mají také tu vlastnost, že jsou schopny pojít velké množství plniva a to až 90% plniva ve směsi. Procentuální zastoupení plniva značně ovlivňuje některé mechanické vlastnosti, jako jsou například pevnost, porozita apod. Například pevnost v tlaku může nabývat hodnot od 10 do 60 MPa. Velikost hodnot závisí na druhu a množství použitého plniva. [6, 11, 12]

Geopolymery jsou nazývány jako materiál „šetřící životní prostředí“, protože při jeho výrobě vzniká až o 80 - 90% méně CO_2 než při výrobě portlandského cementu. Také jsou schopny využít odpadní druhotné suroviny z průmyslu, jako jsou popílky nebo struska. Geopolymery jsou z pohledu životního prostředí také vhodné pro zapouzdření radioaktivních nebo jiných nebezpečných odpadů, toxických kovů a různých dalších toxických odpadů. Další jejich výbornou vlastností je velmi snadná příprava bez nutnosti využití vysokých teplot. [13, 14]

2.6 Mechanismus geopolymerace

Geopolymerní materiály vznikají z roztoků, kdy prvním krokem je rozpuštění základního aluminosilikátu a převedení jeho podstatné části do roztoku. Rozklad probíhá relativně rychle v aluminosilikátovém prostředí o vysokém pH ($\text{pH} > 12$). Vytváří se přesycený hlinitokřemičitý roztok a poté následuje polykondenzace vzniklých křemičitých a hlinitých tetraedrů, které se vzájemně prováží kyslíkovými atomy na vrcholcích tetraedrů. Záporný náboj hlinitanových tetraedrů je kompenzován kationty alkalického kovu v solvatanové formě. Polykondenzační reakce nadále pokračují a vytvářejí tak trojrozměrnou aluminosilikátovou síť geopolymerního materiálu. [15]

Zjednodušeně lze rozdělit průběh geopolymerace do tří fází: (1) rozpouštění aluminosilikátových surovin v zásaditém roztoku, (2) orientace rozpuštěných složek a (3) polykondenzace – tvorba zesíťované gelové struktury. [16]



Obr. 5: Princip geopolymerace.

2.6 Suroviny pro přípravu geopolymérů

Obecně lze říci, že surovinou k výrobě geopolymérů může být jakýkoli materiál, který obsahuje dostatečné množství amorfních hlinitokřemičitanů. Výchozím materiálem při výrobě prvních geopolymérů byl metakaolin. Později se ukázalo, že vhodnými surovinami pro přípravu geopolymérů mohou být také různé druhotné suroviny vzniklé spalováním uhlí, při výrobě železa atd. Mezi tyto suroviny patří vysokopecní či ocelářská struska, popílky, červený kal z výroby hliníku, odpady z těžby atd. Nejpoužívanější jsou popílky a vysokopecní struska. Kromě sekundárních surovin a kalcinovaných jíílů lze k přípravě použít i neupravené přírodní aluminosilikáty. Z výše uvedených materiálů lze také tvořit různé směsi. [17]

Tabulka 1: Dostupnost surovin pro přípravu geopolymérů

Typ	Původ	Dostupnost
Vysokopecní struska	Ocelářský průmysl Výroba surového železa	Velmi vysoká
Ocelářská struska	Ocelářský průmysl Výroba oceli	Vysoká
Slévárenská struska	Slévárenství	Střední
Fluidní popílek	Energetika Fluidní spalování uhlí	Velmi vysoká
Vysokoteplotní popílek	Energetika Vysokoteplotní spalování uhlí	Velmi vysoká
Metakaolin	Umělý minerál Kalcinovaný kaolin	Nízká
Červený kal	Výroba hliníku Bayerův proces	Střední
Těžební odpady	Přírodní minerály a hlíny	Velmi vysoká

Pozn.: Dostupnost:

- Nízká (do 50 tis. t/rok)
- Střední (50 tis. – 1 mil. t/rok)
- Vysoká (1 mil. – 50 mil. t/rok)
- Velmi vysoká (více jak 50 mil. t/rok) [18]

2.6.1 Metakaolin

Metakaolin patří do skupiny jílovitých materiálů. Chemicky se jedná o vysoce reaktivní bezvodý hlinitokřemičitan, který se získává kalcinací kaolinu a kaolinických jílů. Kalcinace se děje v rozmezí teplot 600 – 900 °C. Reaktivita metakaolinu je závislá na kalcinační teplotě, která se pohybuje okolo 700 °C. Tento materiál je všeobecně dobře dostupný, a proto se pro přípravu geopolymérů používá nejčastěji. [16]

2.6.2 Struska

Struska je vedlejší produkt, který vzniká při výrobě železa, oceli a jiných neželezných kovů (olovo, zinek, měď) a při výrobě fosforu. Vzhledem k produkovánému množství mezi nejdůležitější patří vysokopecní a ocelářská struska. Strusky se sestávají převážně z SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 s příměsí sloučenin síry, fosforu a dalších kovů. [5, 17]

Vysokoteplotní struska je vedlejší produkt výroby surového železa. Roztavená struska je prudce ochlazená hašením, čímž se získá téměř amorfni materiál. Jeho chemické složení je především závislé na složení železné rudy. [18]

Ocelářská struska vzniká při konverzi surového železa na ocel. Konverze může probíhat v kyslíkovém konvertoru nebo v pecích s elektrickým obloukem. Chemické složení strusky je velmi rozmanité a mění se v závislosti na vstupních surovinách (surové železo, šrot, struskotvorné přísady), typu vyráběné oceli, podmínek v peci atd. [17]

2.6.3 Popílek

Popílek je materiál, který vzniká spalováním tuhých paliv v elektrárnách, nejčastěji je spalováno uhlí. Je to heterogenní materiál, který se skládá především z kulovitých částic, které obsahují SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a CaO . Obsahuje také nespálené zbytky uhlí a minerálů.

Podle typu spalování můžeme rozlišit dva druhy popílků: vysokoteplotní a fluidní. Vysokoteplotní popílků vznikají při spalování v práškových granulačních ohništích za teplot 1400 – 1500 °C. Za těchto podmínek vzniká SO_2 , který musí být následně nákladně odstraněn. Fluidním spalováním se spaluje pomleté uhlí spolu s pomletým vápencem příp. dolomitem ve fluidní vrstvě. Fluidní vrstvy je dosaženo pomocí proudu vzduchu vháněného do spalovacího prostoru. Panují zde teploty okolo 800 – 900 °C. Spalování může probíhat za atmosférického nebo zvýšeného tlaku. Přídavkem vápence je zabezpečeno odsíření uhlí. [17, 19]

2.7 Alkalické aktivátory

Jako alkalické aktivátory pro aluminátosilikátové systémy lze využít více druhů sloučenin. Jsou to alkalické hydroxidy, alkalické soli, vodní sklo, méně pak aluminátosilikáty či silné minerální hydroxidy. V drtivé většině jsou alkalické aktivátory sodné nebo draselné. Sodné však převažují kvůli své nižší ceně. [17]

2.7.1 Hydroxidy

Hydroxid sodný a draselný se vyrábějí elektrolýzou svého solného roztoku (NaCl, KCl). Jsou to bezbarvé, leptající a silně hygroskopické chemické látky, které se dobře rozpouštějí v etanolu a vodě. Při vzniku uhličitánů pohlcují oxid uhličitý a ostatní plyny kyselé povahy. Jsou to silně korozivní sloučeniny, která leptají sklo a porcelán. [5, 17]

2.7.2 Vodní sklo

Vodní sklo je obecný název pro sloučeniny s různým stechiometrickým složením, které vychází ze vzorce $M_2O \cdot nSiO_2$, kde „M“ je Na nebo K. Teoreticky může být poměr „n“ jakékoli číslo, ale běžně jsou dostupné vodní skla s poměrem 1,60 – 3,85. Mimo tyto hodnoty mají vodní skla omezenou stabilitu. Sodné vodní sklo objevil v roce 1640 Van Helmot, když zkombinoval vhodný hlinitokřemičitan s nadbytkem alkálií. Vodní sklo se vyrábí tavením sklářského písku a uhličitanu sodného nebo draselného ve vanové peci za teplot 1350 – 1450°C. Roztavená sklovina se chladí a drtí na menší kusy. Takto připravené sklo je lehce rozpustné ve vodě, i když rychlost rozpouštění je pomalá. Pro urychlení se sklo rozpouští v autoklávu za teplot 140 -160 °C a tlaku 0,4 – 0,7 MPa. Pro dosažení vhodného modulu se přidává hydroxid. [17, 20]

2.7.3 Alkalické soli – uhličitany alkalických kovů

Uhličitany jsou soli kyseliny uhličitě. S výjimkou uhličitanu sodného, draselného a amonného se téměř nerozpouštějí ve vodě. Všechny se však rozpouští působením kyselin silnějších než kyselina uhličitá a zahříváním. Pro přípravu geopolymerních materiálů se nejčastěji používají uhličitan sodný Na_2CO_3 , draselný K_2CO_3 , výjimečně uhličitan amonný $(NH_4)_2CO_3$. Ostatní uhličitany se díky nízké rozpustnosti ve vodě pro přípravu alkalicky aktivovaných materiálů nepoužívají. [5]

3. Experimentální část

Obsahem experimentální části je navržení vhodného materiálového složení, respektive poměru plniva a geopolymerního pojiva. Podle navrženého složení budou odlity geopolymerní vzorky ve tvaru misek, do nichž bude při různých teplotách odlévána roztavená slitina a budou sledovány změny, ke kterým na geopolymerních vzorcích dochází.

3.1 Forma

Jako forma pro odlévání geopolymerních vzorků pro zvolené experimenty byla s výhodou použita silikonová forma. Forma má šest prohlubní ve tvaru komolého kužele s následujícími rozměry: vrchní průměr 74 mm, spodní průměr 54 mm a výška 32 mm. Pro vytvoření dutiny ve formě byly použity vložky s polyamidu, které jsou dále popsány.



Obr. 6: Forma pro odlévání geopolymerních vzorků.

3.2 Příprava vložek

Jako materiál pro vložky byl zvolen Polyamid-6 (silon) zakoupený ve firmě HOSTR s.r.o. v Liberci ve formě tyčí v průměrech 50 mm a 70 mm v různých délkách (jednalo se o odřezky). Ze zakoupeného materiálu byly připraveny vložky dvou typů.



Obr. 7: Polyamid-6 (silon) průměr 70 mm.

3.2.1 Vložky „A“ pro experiment I. a II.

Z tyčí o průměru 50 mm byly na soustruhu na katedře materiálu zhotoveny vložky ve tvaru komolého kužele o následujících rozměrech: vrchní průměr 40 mm, spodní průměr 20 mm a výška 22 mm. Takto bylo zhotoveno šest vložek. Do vložek byly ve středu většího průměru následně vyvrtány díry o průměru 3 mm a hloubce 8 mm. Poté byla na vložku pomocí šroubu připevněna dřevěná pásovina z důvodu snadnějšího a přesnějšího ustanovení vložky ve formě a také pro snadnější vyjímání vložky z odlitého vzorku geopolymery.



Obr. 8: Vložka typu „A“.

3.2.2 Vložky „B“ pro experiment III., IV. a V.

Vzhledem k tomu, že po umístění vložek prvního typu „A“ byly stěny odlitých „geopolymerních misek“ příliš silné a bylo přepokládáno, že by po teplotní expozici nedocházelo k žádným pozorovatelným změnám, byly pro vložky typu „B“ vybrány následující rozměry: vrchní průměr 64 mm, spodní průměr 44 mm a výška 26 mm. Kvůli větším rozměrům vložek však nebyla možná výroba vložek vlastními silami a tyto byly vyrobeny ve firmě M JINDRA s.r.o v Bohuslavicích nad Metují. Do vysoustruženého komolého kužele byla ve středu většího průměru také vyvrtána díra o průměru 4 mm a hloubce 10 mm. Do díry byl poté přišroubován šroub pro snadnější vyjímání vložky z geopolymerního vzorku. Takto bylo vyhotoveno šest vložek.



Obr. 9: Vložka typu „B“.

3.3 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly odlévány ze směsi geopolymery - plnivo. Pro pojivovou část geopolymerní směsi byly použity cement Baucis L160 a aktivátor Baucis L 160. Jako plnivo geopolymerní směsi jsem použil Lupek A111 zrnitosti 0-1mm. Suroviny byly dodány firmou České lupkové závody, a.s. Nové Strašecí. Míchání cementu Baucis L160 s aktivátorem Baucis L160 bylo prováděno v poměru 5 : 4, dále bylo do uvedené směsi přimícháváno 14 - 20 dílů plniva – lupku A111.

Cement Baucis L160 je komerčně dodávaná prášková složka, aktivátor Baucis L160 je komerčně dodávaná kapalná složka, směs vodního skla s hydroxidem sodným.



Obr. 10: Cement Baucis L160.



Obr. 11: Baucis L160 + aktivátor L160

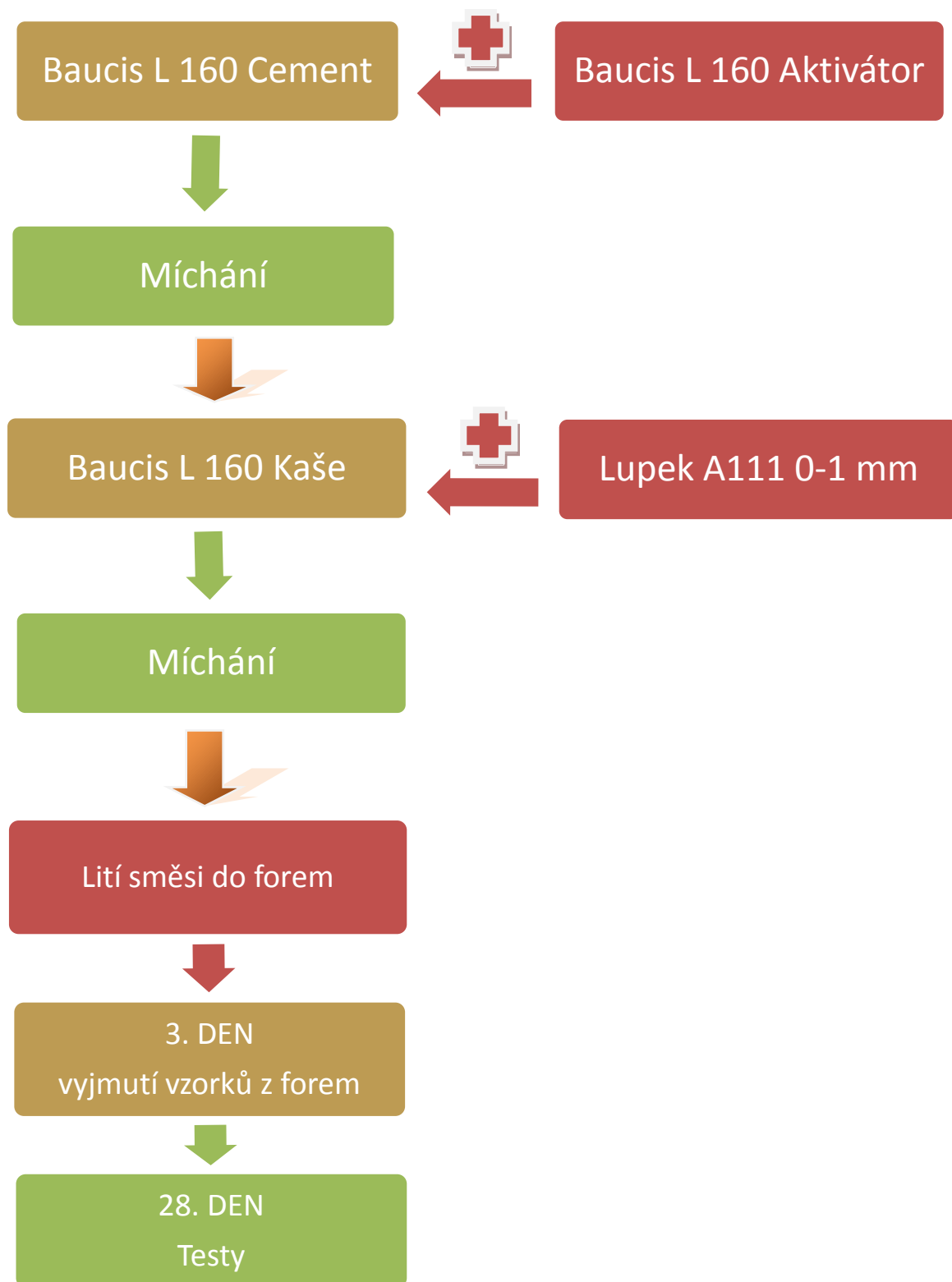


Obr. 12: Baucis L 160 kaše + lupek A111.



Obr. 13: Výsledná geopolymerní směs.

Uvedené schéma podává názorný pohled na pracovní postup míchání směsí a časovou náročnost experimentů. Odlité geopolymerní vzorky byly testovány až po uplynutí 28. dní.



3.3.1 Příprava vzorků pro experiment I.

Vzorky byly připravovány v laboratoři Technické univerzity v Liberci, budova L, laboratoř 3810. Při experimentu I. byla připravena směs o hmotnosti 1000 g - cement Baucis L160 tvořil 22% hm., aktivátor Baucis L160 18% hm., plnivo ve formě lupku A 111 tvořilo 60% hm. Směs byla poté odlita do formy a do ní vtlačena vložka typu „A“. Třetí den byla vložka ze vzorku, respektive z formy odstraněna, ze silikonové formy byly také vyjmuty odlité „misky“. Připravené vzorky byly ponechány volně stojící v laboratoři při normální teplotě a vlhkosti.



Obr. 14: Vzorky I. – obsah lupku A 111 - 60% hm.

U materiálu pro přípravu vzorků došlo k nedostatečnému promísení všech složek směsi a výsledná struktura vzorků byla značně pórovitá. Povrch byl hrubý a nesourodý.

3.3.2 Příprava vzorků pro experiment II.

Pro experiment II. byla připravena směs o hmotnosti 1000 g. Cement Baucis L160 tvořil 22% hm., Baucis L160 aktivátor 18% hm., plnivo ve formě lupku tvořilo 60% hm. Směs byla po smíchání odlita do formy a do ní vtlačeny vložky typu „A“. Třetí den byly vzorky z formy

vyjmuty, vyjmuty byly i vložky typu „A“. Připravené vzorky byly ponechány volně stojící v laboratoři při normální teplotě a vlhkosti.



Obr. 15: vzorky II. – obsah lupku A 111 - 60% hm.

Z fotografických snímků je vidět, že u těchto vzorků II. je struktura oproti vzorkům I. méně pórovitá a povrch více kompaktní. Promíchání všech složek směsi bylo oproti vzorkům I. již dostatečné.

3.3.3 Příprava vzorků pro experiment III.

Při třetí přípravě vzorků byly použity vložky typu „B“. Na základě výpočtu byla připravena směs o celkové hmotnosti 400 g. Cement Baucis L160 tvořil 22% hm., Baucis L160 aktivátor 18% hm., plnivo ve formě lupku A 111 tvořilo 60% hm. Třetí den po odlití byly vzorky vyjmuty z formy a odstraněny vložky. Připravené vzorky byly ponechány volně stojící v laboratoři při normální teplotě a vlhkosti.



Obr. 16: Lití vzorků III – obsah lupku
A 111 - 60% hm.



Obr. 17: Prasklý vzorek III.

Při tomto experimentu se v struktuře objevily z neznámých příčin mírné trhliny a jeden vzorek při vyjímání z formy praskl.

3.3.4 Příprava vzorků pro experiment IV.

Pro IV. experiment byly použity vložky typu „B“. Směs měla celkovou hmotnost 400 g. Cement Baucis L160 tvořil 19,4% hm., Baucis L160 aktivátor 15,6% hm., plnivo ve formě lupku tvořilo 65% hm. Třetí den po odlití byly vzorky vyjmuty z formy a odstraněny vložky. Připravené vzorky byly ponechány volně stojící v laboratoři při normální teplotě a vlhkosti.



Obr. 18: Vzorky IV. –
obsah lupku A111 - 65% hm.



Obr. 19: Lití vzorku IV

Oproti předchozímu složení (60% hm. lupku jako plniva) je výsledná struktura geopolymerních vzorků (65% hm. lupku jako plniva) hrubší.

3.3.5 Příprava vzorků pro experiment V.

Pro V. experiment byly použity vložky typu „B“. Směs měla celkovou hmotnost 400 g. Cement Baucis L160 tvořil 16,7% hm., Baucis L160 aktivátor 13,3% hm., plnivo ve formě lupku tvořilo 70% hm. Třetí den po odlití byly vzorky vyjmuty z formy a odstraněny vložky. Připravené vzorky byly ponechány volně stojící v laboratoři při normální teplotě a vlhkosti.



Obr. 20: Vzorky V. –
obsah lupku A111 - 70 % hm.



Obr. 21: Lití vzorků V.

Při obsahu 70% lupku v geopolymerní směsi je výsledná struktura podstatně hrubší než při všech minulých experimentech.

3.3.6 Příprava vzorků pro experiment III. A

Kvůli vzniku prasklin ve struktuře geopolymerní směsi při experimentu III. bylo navrženo opakované odlití směsi. Byla připravena geopolymerní směs celkové hmotnosti 400 g. Cement Baucis L160 tvořil 22% hm., Baucis L160 aktivátor 18% hm., plnivo ve formě lupku tvořilo 60% hm. Tři dny po odlití byly vzorky vyjmuty z formy a odstraněny vložky. Připravené vzorky byly ponechány volně stojící v laboratoři při normální teplotě a vlhkosti.



Obr. 22: Vzorky III. A - obsah lupku A111 - 60% hm.

Při opakovaném odlití směsi se již žádné praskliny neobjevily.

3.4 Testy s litím roztavené taveniny do vzorků

Tyto experimenty byly prováděny v laboratoři katedry materiálů. Jako médium pro lití byla zvolena slitina cínu a olova při 60% zastoupení olova a 40% zastoupení cínu. Tento materiál byl vybrán pro svou snadnou tavitelnost a dostupnost. Při testech byla dvě hodiny před litím taveniny do vzorků nastavena pec na požadovanou teplotu. Během náběhu teploty v peci byly připraveny pomůcky pro následný pokus – byl použit keramický kelímek pro tavení slitiny, kleště na manipulaci s kelímkem, ochranné rukavice, lžice a ochranné brýle.

3.4.1 Průběh zkoušek

Do rozehřáté pece byl vložen kelímek s kovem (slitinou) v pevném skupenství, který byl v peci ponechán 20 minut, aby se tavenina prohřála na požadovanou teplotu. Vzorky „geopolymerních misek“ byly během této doby připraveny vedle pece na šamotové cihly pro následné odlití slitiny do misek. Před každým odlitím taveniny do vzorku byl nejprve kelímek s pece vyjmut, lžicí byly odebrány nečistoty z taveniny a kelímek opět vložen zpět do pece na 5 minut. Po uplynutí této doby byl kelímek vyjmut z pece a taveninu z něho byla vlita do geopolymerního vzorku. Tavenina byla v geopolymerním vzorku = kelímku ponechána do vlastního vychladnutí a poté byla ze vzorku vyjmuta.



Obr. 23: Pec.



Obr. 24: Kelímek s vyčištěnou taveninou.



Obr. 25: Lití taveniny do geopolymerních vzorků.



Obr. 26: Vyjmutý kov po vychladnutí.

3.4.1.1 Test lití taveniny 1

Při prvním testu byl roztavený kov odlit do vzorků I. a II. při teplotách 500°C, 600°C a 700°C. Po odlití taveniny a jejím následném ztuhnutí následovala vizuální kontrola geopolymerních vzorků.

Test při teplotě 500°C:

- ❖ Vzorek I.
 - Žádné viditelné změny.



Obr. 27: Vzorek I. po odlití slitiny.

- ❖ Vzorek II.
 - Žádné viditelné změny.



Obr. 28: Vzorek II. po odlití slitiny.

Test při teplotě 600°C:

❖ Vzorek I.

- Změna barvy povrchu v horních 2/3 vzorku – je patrné ztmavnutí materiálu.



Obr. 29: Vzorek I. po odlití slitiny.

❖ Vzorek II.

- Změna barvy povrchu v horních 2/3 vzorku – je patrné ztmavnutí materiálu.



Obr. 30: Vzorek II. po odlití slitiny.

Test při teplotě 700°C:

Tavenina vyhřátá na teplotu 700°C při lití vřela (bublala), proto došlo k částečnému potřísnění vzorků taveninou mimo předpokládanou část vzorku.

❖ Vzorek I.

- Změna barvy – je patrné ztmavnutí materiálu.
- Mírné natavení povrchu materiálu.
- U pórů vznikly mírné praskliny.



Obr. 31: Vzorek I. po odlití slitiny.

❖ Vzorek II.

- Mírné natavení povrchu materiálu
- Změna barvy – je patrné ztmavnutí materiálu.



Obr. 32: Vzorek II. po odlití slitiny.

U vzorku I. se díky větší pórovitosti projeví praskliny, u kompaktnějšího vzorku II. k takovému jevu nedošlo.

Po dokončení testu a následné konzultaci bylo rozhodnuto, že pro větší transparentnost a lepší vyhodnocení výsledků bude zapotřebí zhotovit vložky typu „B“, které byly využity pro vzorky III., III. A, IV. a V., kde se díky tenčím stěnám projeví tepelná zátěž na vzorky markantněji a plocha pro hodnocení stavu po odlití slitiny bude větší a výrazně lepší pro pozorování. Také byl změněn rozsah teplot a to na 600°C, 700°C a 800°C.

3.4.1.2 Test lití taveniny 2

Při druhém testu byl roztavený kov odlit do vzorků III., III. A, IV., a V. při teplotách 600°C, 700°C a 800°C. Po odlití taveniny a jejím následném ztuhnutí následovala vizuální kontrola geopolymerních vzorků.

Test při teplotě 600°C:

❖ Vzorek III.

- Změna barvy pouze na vrchním okraji vzorku – je patrné ztmavnutí materiálu.
- Zvětšení trhlin, které na povrchu vzorku byly již před odlitím kovu.
- Nové menší trhliny na vnitřní straně vzorku.
- Nové malé trhliny i na vnějším povrchu vzorku.



Obr. 33: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- Změna barvy pouze na vrchním vnitřním okraji vzorku – je patrné ztmavnutí materiálu.
- Nové ojedinělé, malé trhliny na vnitřní straně vzorku.



Obr. 34: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Natavení povrchu vzorku v dolních 2/3 vzorku spojené se změnou barvy – je patrné ztmavnutí materiálu.



Obr. 35: Vzorek IV. po odlití slitiny.

- ❖ Vzorek V.
 - Žádné viditelné změny.



Obr. 36: Vzorek V. po odlití slitiny.

Test při teplotě 700°C:

Tavenina vyhřátá na teplotu 700°C při lití vřela (bublala), proto došlo k částečnému potřísnění vzorků taveninou mimo předpokládanou část vzorku.

- ❖ Vzorek III.
 - Změna barvy vzorku – je patrné ztmavnutí materiálu.
 - Zvětšení trhlin, které na vzorku byly již před odlitím kovu.
 - Nové trhliny na vnitřní straně vzorku.
 - Změna barvy povrchu na vnější straně vzorku - zbělání, na některých místech lehce namodralý odstín.
 - Nové malé trhliny na vnější straně povrchu i vnějším dně vzorku.



Obr. 37: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- Změna barvy pouze v horní vnitřní části vzorku – je patrné ztmavnutí materiálu.
- Nové malé trhliny na vnitřní straně vzorku, u pórů trhliny výraznější.
- Nové ojedinělé trhliny u pórů na vnější straně vzorku.
-



Obr. 38: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Natavení povrchu vzorku v dolních 2/3 vzorku spojené se změnou barvy – je patrné ztmavnutí materiálu.
- Nové ojedinělé malé povrchové trhliny na vnitřní straně.



Obr. 39: Vzorek IV. po odlití slitiny.

- ❖ Vzorek V.
 - Žádné viditelné změny.



Obr. 40: Vzorek V. po odlití slitiny.

Test při teplotě 800°C:

Tavenina vyhřátá na 800°C při lití vřela (bublala, prskala), proto došlo k poměrně velkému potřísnění vzorků taveninou mimo předpokládanou část vzorku a také k potřísnění šamotových cihel, které sloužily jako podklad pro vzorky.

- ❖ Vzorek III.
 - V místě prvního styku taveniny s vzorkem došlo k výraznému ztmavnutí.
 - Změna barvy, v dolních 2/3 vnitřní strany vzorku došlo k namodráání povrchu, ve zbytku vnitřní strany došlo ke ztmavnutí.
 - Zvětšení trhlin, které na vzorku byly již před odlitím kovu.
 - Nové velké trhliny na vnitřní straně vzorku.
 - Změna barvy povrchu na vnější straně vzorku - zbělání, v horní polovině vzorku namodralý odstín.
 - Nové velké trhliny na vnější straně i vnějším dně vzorku.



Obr. 41: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- V místě prvního styku taveniny s vzorkem došlo k výraznému ztmavnutí.
- Změna barvy, v dolních 2/3 vnitřní strany vzorku došlo k namodrání povrchu, ve zbytku vnitřní strany došlo ke ztmavnutí.
- Nové větší trhliny na vnitřní straně vzorku.
- Nové malé trhliny a ojedinělé velké trhliny na vnější straně vzorku.



Obr. 42. Vzorek III.A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- V místě prvního styku taveniny se vzorkem došlo k jeho výraznému ztmavnutí.
- Natavení povrchu vzorku v dolních 2/3 vzorku spojené se změnou barvy - ztmavnutí až namodráním, v horní třetině došlo k výraznému ztmavnutí.
- Nové ojedinělé malé povrchové trhliny na vnitřní straně.
-



Obr. 43. Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- V místě prvního styku taveniny se vzorkem došlo k výraznému ztmavnutí.
- Jinak žádné viditelné změny.
-



Obr. 44: Vzorek V. po odlití slitiny.

3.4.1.3 Test lití taveniny 3

Při třetím testu byla opakovaně odlévána slitina do již jednou testovaných vzorků III., III. A, IV., a V. při teplotách 600°C, 700°C a 800°C. Test probíhal v laboratoři přípravy metalografických vzorků v peci (Mc-6), protože pec používaná při předchozích testech byla toho času nefunkční.

Test při teplotě 600°C:

❖ Vzorek III.

- Žádná změna barvy oproti prvnímu testu.
- Mírné zvětšení trhlin vzorku.
- U větších pórů došlo k jejich zvětšení a popraskání okolí.



Obr. 45: Vzorek III. po odlití slitiny.



Obr. 46: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- Žádná změna barvy proti předchozímu testu.
- Zvětšení trhlin vzorku.
- U jednoho z pórů došlo k jeho zvětšení a popraskání okolí.
- Vznikly nové malé trhliny na vnější i vnitřní straně vzorku.



Obr. 47: Vzorek III. A po odlití slitiny.



Obr. 48: Vzorek III.A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Oproti předchozímu testu nedošlo k žádným viditelným změnám.



Obr. 49: Vzorek IV. po odlití slitiny.



Obr. 50: Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- Oproti předchozímu testu nebyly patrné žádné viditelné změny.



Obr. 51: Vzorek V. po odlití slitiny.



Obr. 52: Vzorek V. po odlití slitiny.

Test při teplotě 700°C:

Tavenina vyhřátá na teplotu 700°C při lití vřela a tak došlo při odlévání k částečnému potřísnění vzorků taveninou mimo předpokládanou část vzorku.

❖ Vzorek III.

- Žádná změna barvy proti předchozímu testu.
- Zvětšení trhlin vzorku.
- Nové menší trhliny na vnějším i vnitřním povrchu vzorku.
- U jedné trhliny na vnější části došlo k výraznému zvětšení.
- U jednoho z vnitřních pórů došlo k jeho zvětšení a popraskání okolí.



Obr. 53: Vzorek III. po odlití slitiny.



Obr. 54: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- Žádná změna barvy oproti předchozímu testu.
- Zvětšení trhlin vzorku.
- Tvorba nových menších trhlin na vnějším povrchu vzorku.
- U většiny pórů na vnitřní straně vzorku došlo k jejich mírnému zvětšení a popraskání okolí.



Obr. 55: Vzorek III. A po odlití slitiny.



Obr. 56: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Žádná změna barvy ani další natavení proti předchozímu testu.
- V místě prvního styku taveniny se vzorkem došlo k mírnému úbytku materiálu.
- Trhliny na vnitřní straně zůstávají stejné.



Obr. 57: Vzorek IV. po odlití slitiny.



Obr. 58: Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- Žádné viditelné změny.



Obr. 59: Vzorek V. po odlití slitiny.



Obr. 60: Vzorek V. po odlití slitiny.

Test při teplotě 800°C:

Tavenina vyhřátá na 800°C při lití a následně i ve vzorcích vřela, proto došlo k velkému potřísnění vzorků taveninou mimo předpokládanou část a také k potřísnění okolí vzorků.

❖ Vzorek III.

- Výrazné ztmavnutí té části vzorku, kde se tavenina poprvé dostala do kontaktu se vzorkem, v další vnitřní části vzorku došlo k jeho zesvětlení.
- Výrazné zvětšení trhlin.
- Nové trhliny se objevily na vnější i vnitřní straně vzorku.
- U pórů na vnitřní straně došlo k jejich zvětšení, popraskání okolí a úbytku materiálu v jejich okolí.



Obr. 61: Vzorek III. po odlití slitiny.



Obr. 62: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- V místě prvního kontaktu s taveninou došlo výraznému ztmavnutí vzorku. Zbytek dna vzorku také ztmavl, ale ne již tak výrazně.
- Zvětšení trhlín vzorku.
- Na vnitřní i vnější straně vzorku se objevily nové menší trhliny.
- U většiny pórů došlo k jejich zvětšení a popraskání okolí.



Obr. 63: Vzorek III. A po odlití slitiny.



Obr. 64: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- V místě prvního kontaktu taveniny se vzorkem dochází k dalšímu ztmavnutí.
- Na vnitřní straně vzorku je ztmavnutí (namodráání) povrchu výraznější než po prvním testu.
- Trhliny na vnitřní straně zůstávají bez změn.



Obr. 65: Vzorek IV. po odlití slitiny.



Obr. 66: Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- V místě prvního kontaktu taveniny se vzorkem došlo k jeho dalšímu ztmavnutí.
- Na několika místech prvního styku taveniny se vzorkem došlo k mírnému úbytku materiálu.
- Žádné další viditelné změny.



Obr. 67: Vzorek V. po odlití slitiny.



Obr. 68: Vzorek V. po odlití slitiny.

3.4.1.4 Test lití taveniny 4

Při čtvrtém testu byla opakovaně odlévána slitina do již dvakrát testovaných vzorků III., III. A, IV., V. při teplotách 600°C, 700°C a 800°C. Test probíhal v laboratoři přípravy metalografických vzorků, stejně jako test číslo 3.

Test při teplotě 600°C:

❖ Vzorek III.

- Na vnější straně vzorku došlo na některých místech k bodovému ztmavnutí povrchu vzorku.
- Na vnitřní straně nenastala žádná viditelná změna barvy.
- Mírné zvětšení trhlin.
- U dalších pórů došlo k jejich zvětšení a popraskání okolí.
-



Obr. 69: Vzorek III. po odlití slitiny.



Obr. 70: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- Žádná změna barvy proti předchozím testům.
- Trhliny bez změn.
- U jednoho póru došlo k jeho výraznému zvětšení a popraskání okolí.



Obr. 71: Vzorek III. A po odlití slitiny.



Obr. 72: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Proti předchozím testům nebyly patrné žádné viditelné změny.



Obr. 73: Vzorek IV. po odlití slitiny.



Obr. 74: Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- Proti předchozím testům nabyly patrné žádné viditelné změny.



Obr. 75: Vzorek V. po odlití slitiny.



Obr. 76: Vzorek V. po odlití slitiny.

Test při teplotě 700°C:

Při tomto testu došlo k mírnému potřísnění vzorku mimo předpokládanou část, kvůli nestabilitě taveniny při lití.

❖ Vzorek III.

- Změna barvy vnitřního povrchu - povrch zesvětlal.
- U největšího póru na dně došlo k úbytku materiálu.
- Mírné zvětšení dosavadních trhlin.
- Vznik trhlin i na vnějším dně vzorku.



Obr. 77: Vzorek III. po odlití slitiny.



Obr. 78: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- Žádná změna barvy oproti předchozím testům.
- Mírné zvětšení dosavadních trhlin.
- U některých pórů došlo k úbytku materiálu v jejich těsném okolí.



Obr. 79: Vzorek III. A po odlití slitiny.



Obr. 80: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Žádná změna barvy proti minulým testům.
- Trhliny na vnitřní straně zůstaly stejné.
- Nové ojedinělé trhliny na vnější straně vzorku.



Obr. 81: Vzorek IV. po odlití slitiny.



Obr. 82: Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- V jednom bodě na vnitřní straně vzorku došlo k jeho zčernání - nejspíše z důvodů nečistoty v tavenině.
- Kromě výše zmíněného zde nejsou žádné viditelné změny.



Obr. 83: Vzorek V. po odlití slitiny.



Obr. 84: Vzorek V. po odlití slitiny.

Test při teplotě 800°C:

Při odlévání taveniny zahřáté na 800°C byla tavenina značně nestálá, vřela a bublala. Při lití taveniny do vzorků proto docházelo k potřísnění vzorků mimo předpokládanou část i k potřísnění okolí vzorků.

❖ Vzorek III.

- Změna barvy ve vnitřní části vzorku. Došlo k zesvětlení až namodráání, zezelenání povrchu.
- Zvětšení trhlín vzorku.
- Další nové trhliny na vnější i vnitřní straně vzorku.
- U pórů došlo k dalšímu úbytku materiálu v jejich okolí.
- U jedné praskliny se objevil veliký pór, který před testem nebyl vidět.



Obr. 85: Vzorek III. po odlití slitiny.



Obr. 86: Vzorek III. po odlití slitiny.

❖ Vzorek III. A

- V horní polovině vnitřní části vzorku došlo ke změně barvy - namodrání, zezelenání.
- Mírné zvětšení dosavadních trhlin.
- U jednoho póru došlo k výraznému zvětšení a popraskání okolí.



Obr. 87: Vzorek III. A po odlití slitiny.



Obr. 88: Vzorek III. A po odlití slitiny.

❖ Vzorek IV.

- Žádná změna barvy proti předchozím testům.
- V místě prvního kontaktu taveniny na vzorku došlo k mírnému úbytku materiálu.
- Trhliny na vnitřní straně zůstávají bez změn.



Obr. 89: Vzorek IV. po odlití slitiny.



Obr. 90: Vzorek IV. po odlití slitiny.

❖ Vzorek V.

- V místě prvního styku taveniny s povrchem vzorku došlo k dalšímu ztmavnutí.
- Proti předchozím testům nebyly patrné žádné další viditelné změny.



Obr. 91: Vzorek V. po odlití slitiny.



Obr. 92: Vzorek V. po odlití slitiny.

4. Diskuse výsledků

Výsledky testů u prvních dvou typů vzorků I. a II. byly neuspokojivé. Výsledné geopolymerní misky měly příliš velkou tloušťku stěny formy cca 17 mm. Při vylití slitiny kovu o vysoké teplotě na nich nebylo možné pozorovat jak se geopolymerní systém zachová při vystavení skokové teplotní zátěži vyšší než 600°C.

Proto byly připraveny nové typy vzorků III. A, III., IV. a V., pro které byly zvoleny odlišné vložky do formy. Tyto vzorky měli poté tloušťku stěny cca 5 mm. Geopolymerní materiálový systém, který dobře odolává působení slitiny při vysokých teplotách, aniž by docházelo k patrnému porušení vzorku, by měl obsahovat vyšší podíl plniva. V případě zvoleného plniva - Lupku A111 to bylo při obsahu 65% a 70% hmotnosti systému.

Tyto vzorky byly vystaveny jednorázové i opakované skokové teplotní zátěži. Slitina byla do vzorků odlévána při teplotách 600°C, 700°C a 800°C. Vzorky III. A a III., které obsahovaly nejmenší množství plniva a to 60% hmotnosti systému vypadaly nehomogenněji a vzhledově nejlépe. Po nich následovaly vzorky IV. s 65% hmotnostním podílem a nejhůře vypadaly vzorky V. s 70% hmotnostním podílem lupku A111.

Po jednorázovém odlití roztavené slitiny při teplotách 600°C, 700°C a 800°C bylo zjištěno, že na pohled nehomogennější vzorky III. A a III. s 60% hmotnostním zastoupením lupku A111 jsou značně poškozeny. U výše zmíněných vzorků po odlití roztavené slitiny a jejím následném zchladnutí docházelo k vzniku vážných trhlin na celém povrchu vzorku, k velkému úbytkům materiálu u pórů, menšímu úbytku materiálu mimo ně a výrazné změně barvy vzorku. Při jejich opakovaném zkoušení se výše specifikované jevy vyskytovaly častěji a ve větším měřítku. Trhliny se při opakovaném testu rozšiřovaly a tvořily se trhliny nové. Úbytek materiálů byl významnější a barevnost vzorku se také měnila. Tuto geopolymerní směs nemohu považovat za vhodný systém pro potenciální využití pro vysoké teploty.

Vzorky IV. a V. byli také vystaveny jednorázové i opakované teplotní skokové zátěži odlitím roztavené slitiny při teplotách 600°C, 700°C a 800°C. U těchto vzorků nedošlo nijak výrazně k jejich destrukci. U výše zmíněných vzorků byly po odlití roztavené slitiny a jejím následném ztuhnutí pozorovány pouze změny barevnosti, drobné praskliny a vznik pórů spojený a mírným úbytkem materiálu. Výše specifikované jevy se více projevily u vzorku IV. s 65% hmotnostním zastoupením lupku A111 v geopolymerní směsi. U vzorků V. se 70% hmotnostním zastoupením lupku A111 byly výše zmíněné jevy pozorovatelné jen minimálně.

Změny barevnosti lze vysvětlit chemickými reakcemi probíhajícími mezi roztavenou slitinou a geopolymerním materiálem při vysokých teplotách. Vznik drobných prasklin, pórů a malý úbytek materiálu souvisí s možnou nehomogenitou vzorků. Tyto geopolymerní systémy při 65% a 70% hmotnostním zastoupení lupku A111 lze považovat za vyhovující. Na základě provedených testů mohou navržené geopolymerní směsi považovat za vhodné systémy pro potenciální využití při vysokých teplotách.

Z výsledků testů je patrné, že nejestetičtěji vypadající vzorky s 60% hmotnostním zastoupením lupku A111 při styku se slitinou o vysoké teplotě přes 600°C se značně deformují. Proto není vhodné je k těmto účelům používat. Jako vhodnější se jeví geopolymerní směsi s 65% a 70% procentním zastoupením lupku A111, které nejsou tak homogenní a estetické jako vzorky s 60% zastoupením lupku A111. Tyto geopolymerní směsi se však daleko méně deformují po jednorázovém i opakovaném skokovém zatížení roztaveným kovem o teplotě vyšší než 600°C. Proto je lze považovat za vhodné k potenciálnímu použití při vysokých teplotách.

5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posoudit chování navrženého geopolymerního systému v případě jeho přímého kontaktu s roztaveným kovem nebo roztavenou slitinou.

Práce byla zaměřena na návrh způsobu hodnocení tepelného namáhání geopolymerního materiálu, návrh vhodného materiálového složení geopolymerního systému, který vydrží skokovou teplotní zátěž vyšší než 600°C a hodnocení změn geopolymerního materiálu vystaveného těmto teplotám v případě jednonásobného a vícenásobného tepelného namáhání.

Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že:

- pro adekvátní hodnocení chování geopolymerního materiálu vystaveného skokovým teplotním změnám zprostředkovaným odlitím roztavené slitiny je zapotřebí připravit tenkostěnnou formu, tloušťka formy byla cca 5 mm,
- geopolymerní materiálový systém, který dobře odolává působení roztavené slitiny, aniž by docházelo k patrnému porušení vzorku, by měl obsahovat vyšší podíl plniva – v případě provedených experimentů Lupku A 111,
- za vyhovující obsah Lupku je v hodnocených případech možné považovat 65% a 70% hmotnostních,
- vzorky tohoto složení byly vystaveny jednorázové i opakované teplotní skokové zátěži – odlití roztavené slitiny při teplotách 600°C, 700°C a 800°C aniž by došlo k jejich destrukci,
- u výše zmíněných vzorků byly po odlití roztavené slitiny do vzorků a jejím následném ztuhnutí pozorovány pouze změny barevnosti, drobné praskliny, vznik pórů popřípadě úbytek materiálu,
- změny barevnosti lze vysvětlit chemickými reakcemi probíhajícími mezi roztavenou slitinou a geopolymerním materiálem při vysokých teplotách, vznik drobných prasklin, pórů popřípadě úbytek materiálu souvisí s možnou nehomogenitou vzorků.

Na základě provedených hodnocení lze navržené geopolymerní směsi považovat za vhodné systémy, které jsou potenciálně využitelné pro vysoké teploty.

6. Literatura a použité zdroje:

- [1] STRAŇÁK, Vít. Geopolymery . [online]. 2010 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z WWW: http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery
- [2] DĚDEČKOVÁ, Lenka. Geopolymery: Cesta od pyramid k mostům. [online]. 2010 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z WWW: <http://21stoleti.cz/blog/2010/12/22/geopolymery-cesta-od-pyramid-k-mostum/>
- [3] ŠKVÁRA, František. a kol. Geopolymerní beton (také starověký material?). [online]. 2010 [cit. 2012-12-10]. Dostupné z WWW: http://www.vscht.cz/sil/pojiva/Geopolymerni_beton_starovek.pdf
- [4] Wikipedie. [online]. 2013 [cit. 2013-01-08]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zikurat>
- [5] ČERVINKA, Josef. Geopolymery – využití pro restaurování kamene a souvisejících material. Bakalářská práce, Univerzita Pardubice, 2008
- [6] ROY, Della. a kol. Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor and Francis, NY 10016, USA, 2006
- [7] Geopolymer Valley: Nitky směřují do České Republiky. [online]. 2007 [cit. 2013-01-08]. Dostupné z WWW: <http://technik.ihned.cz/c1-21783300-geopolymer-valley-nitky-smeruji-do-ceske-republiky>
- [8] Česká společnost pro výzkum a použití jílu, inforeporty č. 37. [online]. 2007 [cit. 2013-01-08]. Dostupné z WWW: <http://czechclaygroup.cz/index.php?page=inforeport>
- [9] DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymer: Chemistry and Applications. Institut Geopolymere, Saint-Quentin, Francie, 2008
- [10] DAVIDOVITS, Joseph. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer Conference, October 28-29, Melbourne, Austrálie, 2002
- [11] VACÍK, J. a kol. Přehled středoškolské chemie. Praha, 1993

- [12] MALER, Jaroslav. Studium polykondenzace křemičitanu s hydroxohlinitanem ve vodném prostředí. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati v Zlíně, Zlín, 2008
- [13] KONÍČKOVÁ, Hana. Využití odpadní pryžové drti z pneumatic jako plniva do geopolymerního. Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati v Zlíně, Zlín, 2010
- [14] Geopolymer Institute. Geopolymer cement for storage of toxic and radioactive wastes. [online]. 2006 [cit. 2013-01-15]. Dostupné z WWW: <http://www.geopolymer.org/applications/geocistem>
- [15] Chempoit – vědci pro průmysl a praxi. Mechanismus geopolymerního. [online]. 2011 [cit. 2013-01-15]. Dostupné z WWW: http://www.hribi.net/video_youtube/geopolymerace/J1kZv7umxPk
- [16] RINNOVÁ, Martina. Studium vlivu složení alkalického aktivátoru na vlastnosti geopolymerních materiálů. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2012
- [17] KOPLÍK, Jan. Inhibice nebezpečných látek v alumináto-silikátových systémech. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno. 2012
- [18] BULEJKO, Pavel. Příprava a charakterizace betonů na bázi směsného geopolymerního pojiva. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno. 2011
- [19] MACHOVSKÝ, Tomáš. Testování reaktivity surovin pro geopolymerního. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati v Zlíně. Zlín. 2009
- [20] HLAVÁČ, Jan. Základy technologie silikátů. SNTL. Praha. 1988